
RAPPORT

Kunstsilo Kristiansand

OPPDRAAGSGIVER

Sørlandets Kunstmuseum

EMNE

Vurdering av eksisterende bygning –
Betongteknologiske undersøkelser

DATO / REVISJON: 15. januar 2018 / 0

DOKUMENTKODE: 20170266-OKP-RAP-001



Multiconsult

Denne rapporten er utarbeidet av Multiconsult i egen regi eller på oppdrag fra kunde. Kundens rettigheter til rapporten er regulert i oppdragsavtalen. Hvis kunden i samsvar med oppdragsavtalen gir tredjepart tilgang til rapporten, har ikke tredjepart andre eller større rettigheter enn det han kan utlede fra kunden. Multiconsult har intet ansvar dersom rapporten eller deler av denne brukes til andre formål, på annen måte eller av andre enn det Multiconsult skriftlig har avtalt eller samtykket til. Deler av rapportens innhold er i tillegg beskyttet av opphavsrett. Kopiering, distribusjon, endring, bearbeidelse eller annen bruk av rapporten kan ikke skje uten avtale med Multiconsult eller eventuell annen opphavsrettshaver.

RAPPORT

OPPDRAG	Kunstsilo Kristiansand	DOKUMENTKODE	20170266-OKP-RAP-001
EMNE	Tilstandsvurdering og prøvetaking av betong	TILJENGELIGHET	Åpen
OPPDRAGSGIVER	Sørlandets Kunstmuseum	OPPDRAGSLEDER	Ellen M. Rondestvedt
KONTAKTPERSON	Erik Sandsmark	UTARBEIDET AV	Ole Kristian Prestrud
KOORDINATER	SONE: XXX ØST: XXXX NORD: XXXXXX	ANSVARLIG ENHET	10106030 Tilstand og bygningsvern
GNR./BNR./SNR.	X / X / X / Kristiansand		

SAMMENDRAG

Multiconsult as (tidligere Hjellnes Consult as) har gjennomført en tilstandsvurdering av betongkonstruksjonene ved silobygningen på Odderøya i Kristiansand som et ledd i forprosjektet for å danne grunnlag for videre strategi ved ombygging av silobygningen til museum. Rapporten inneholder vurderinger på bakgrunn av visuell inspeksjon og prøvetagning av betongen utført på om lag halvparten av silorørene. Prøvetakingen ble foretatt hovedsakelig fra lift i uke 46 - 2017.

Det er observert en rekke skader ved silobygningen, og den mest fremtredende skadeårsaken er karbonatisering av innvendig side av siloene. Dette fører til at armeringen ligger utsatt til for korrosjon der hvor karbonatiseringsfronten har nådd armeringen. Basert på undersøkelsene antas det at om lag 20 – 25 % av armeringen ligger i karbonatisert betong. For utsiden av silobygningen er det mer beskjeden karbonatisering, men det er enkelte partier hvor armeringen ligger med liten overdekning, og betongoverdekningen sprenges ut på grunn av korrosjon. Malingsfilmen utvendig er så værslitt at den i praksis ikke gir noen beskyttelse for betongen lenger.

Det er generelt mye oppsprekking i silokonstruksjonen. Dette er sprekker som sannsynligvis har oppstått i bygningens tidlige alder, og skyldes både svinn og mangelfulle tiltak ved støpeskjøter. Videre kan enkelte sprekker ha sin årsak i temperaturforskjeller på innsiden og utsiden av siloen.

Tilstandskontrollen har omfattet om lag halvparten av siloene, men det er ikke foretatt prøvetaking av trappehus eller lagerbygning, ettersom disse skal rives ved ombygningen. Det er heller ikke tatt prøver av mellomkamrene i silobygningen, men det anbefales at det utføres supplerende prøvetaking av disse og de 15 gjenværende siloene under utførelsen av rehabiliteringsarbeidene for å avdekke om det kan være enkelte områder som er bedre eller dårligere enn det som er funnet så langt.

Det anbefales at det iverksettes tiltak med rehabilitering av silobygningen med fjerning av maling, mekanisk utbedring av alle sprekker, steinreir, avskallinger m.v. og elektrokjemisk realkalisering for siloenes innside.

Det vil være en stor fordel å utføre betongrehabiliteringen før de øvrige bygningsmessige arbeidene med riving og ombygging settes i gang.

1	15.01.2018	Endelig rapport	Ole Kristian Prestrud	Lasse Bjerke	Ellen M. Rondestvedt
REV.	DATO	BESKRIVELSE	UTARBEIDET AV	KONTROLLERT AV	GODKJENT AV

INNHOLDSFORTEGNELSE

1	Bakgrunn og formål	5
1.1	Generelt	5
1.2	Grunnlagdokumentasjon.....	5
1.3	Planlegging og gjennomføring av undersøkelser	5
2	Tilstandsundersøkelser	7
2.1	Betongteknologisk prøvetaking	7
2.2	Armeringsoverdekning og korrosjon	7
2.3	Karbonatisering.....	8
2.4	Kloridprøver	9
2.5	Prellhammertest	10
2.6	Trykkprøving av borkjerner.....	10
2.7	Prøveresultater	12
2.7.1	Kloridprofiler	13
3	TILSTANDSVURDERING	14
3.1	Visuelle observasjoner	14
3.2	Vurdering av prøveresultater.....	14
4	TILTAK	17
4.1	Mekanisk utbedring av betongskader.....	17
4.1.1	Fjerning av betong/hugging	17
4.1.2	Rengjøring av armering.....	17
4.1.3	Korrosjonsbeskyttelse av armering.....	18
4.1.4	Hefebro.....	18
4.1.5	Utfylling av sårflatene med reparasjonsmørtel	18
4.1.6	Overflatebehandling/impregnering	18
4.2	Elektrokjemisk realkalisering	19
5	Konklusjon.....	20
6	Fotodokumentasjon.....	21

1 Bakgrunn og formål

1.1 Generelt

Multiconsult as (tidligere Hjellnes Consult as) har på oppdrag fra Sørlandets Kunstmuseum (SKMU) gjennomført tilstandsvurdering av betongkonstruksjonene silobygningen på Odderøya i Kristiansand. Hensikten med undersøkelsene er å kartlegge tilstanden til eksisterende betongkonstruksjoner for å danne grunnlag for videre strategi ved den planlagte bruksendringen og ombyggingen til museumsformål.

Silobygningen er bygget i flere byggetrinn, hvor den eldste delen med 15 siloer ble oppført i 1936, og så videre utvidelse med ytterligere 15 siloer i 1939. Silokonstruksjonen er utført i plaststøpt betong ved bruk av glideforskaling.

1.2 Grunnlagsdokumentasjon

Fra SKMU's nettsider har vi fått tilgang til diverse tegninger som har vært nyttig for planlegging og gjennomføring av undersøkelsene. Tegningsgrunnlaget består av planer, snitt og detaljer fra byggetiden, samt diverse arkitekttegninger fra nyere tid.

I tillegg har vi fått utlevert rapport fra en tidligere tilstandskontroll utført av Sweco.

Tegningene viser form og armeringsføring, men det er ikke gitt opplysninger om betongfasthet eller stål kvalitet.

1.3 Planlegging og gjennomføring av undersøkelsene

Det ble foretatt en visuell befarings fra bakkenivå, og det ble benyttet drone til nær-filming av silobygningens fasadeflater. Denne visuelle undersøkelsen dannet videre grunnlag for planlegging og uttak av prøver, basert på skaderegistreringer fra filmingen. (Dronefilmen kan utleveres på forespørsel).

Vi har i tillegg fått innspill fra Degree of Freedom Engineers på hvilke deler av konstruksjonene det er ønskelig å foreta prøvetaking, basert på en vurdering av hva som vil være kritiske snitt med hensyn til hvilke konstruksjonsdeler som vil bli utsatt for størst belastning under ombyggingen.

Det er foretatt prøvetaking ved totalt 31 prøvesteder, hvor alle prøvene er av selve silokonstruksjonen. Det er ikke tatt ut prøver av trappehus, lagerbygning eller andre konstruksjonsdeler innvendig i bygningen, ettersom disse bygningsdeler er planlagt revet under ombyggingen.

Følgende aktører har deltatt i forbindelse med prøvetakingen

Hjellnes Consult as

Visuell inspeksjon, overdekningsmålinger, karbonatiseringsprøver og kloridmålinger i felt og laboratorium.

CheckD as

Nærfilming med drone

Høyden as

Taubasert tilkomstteknikk for inspeksjon og prøvetaking innvendig i siloene.

Kristiansand Bygg as

Uttak av borkjerner

Oslo Liftutleie as

Levering av bilmontert lift med fører.

Multiconsult AS

Trykktesting av borkjerner, med måling av karbonatisering og visuell bedømmelse av kjerner.

Tilstandskontrollen og prøvetakingen foregikk i uke 46, 2017.

2 Tilstandsundersøkelser

Det er foretatt en visuell undersøkelse av silokonstruksjonen fra bakkenivå, nær visuell kontroll fra lift, og ved hjelp av dronefilming. I tillegg er det gjennomført en detaljert undersøkelse av utvalgte prøvesteder mhp. betongteknologisk prøvetaking, og utboring av kjerneprøver for trykktesting. Enkeltpunkt er utmeislet for visuell bedømmelse av armeringens tilstand. Utmeisling har også fungert som "kalibrering" av ikke-destruktive overdekningsmålingene.

2.1 Betongteknologisk prøvetaking

For alle 31 prøvesteder er det gjort systematisk måling av armeringens overdekning og det er tatt ut karboniseringsprøver. Videre er det tatt ut borstøv for måling av kloridinnhold i betongen. Det er boret ut kjerner for trykktesting i laboratorium, og det er foretatt prellhammeresting på betongoverflaten.

De utførte målingene gir etter vårt syn et representativt bilde av betongens generelle tilstand. I de følgende punkter er det gitt en generell orientering om de benyttede prøvemetoder, samt hensikten med disse. Det er også gitt en kort innføring i aktuelle skade- og nedbrytningsmekanismer i betong.

2.2 Armeringsoverdekning og korrosjon

Armering i betong har i utgangspunktet en meget god beskyttelse mot korrosjon ved at det dannes en passivfilm på armeringens overflate når den blir innstøpt i betong, som følge av et meget alkalisk miljø. Det er to måter denne passivfilmen kan brytes ned på, ved karbonisering eller ved kloridangrep. Armeringens betongoverdekning utgjør således en buffersone, hvor tykkelsen på overdekning og betongkvaliteten er avgjørende for hvor god motstand betongkonstruksjonen vil ha for nedbrytning.

Manglende overdekning er en av de hyppigst opptredende skadeårsaker ved konstruksjoner, og gjør konstruksjonene mer utsatt for nedbrytningsmekanismer som karbonisering og kloridinntregning med korrosjon på armeringen som følge.

Når armeringen korroderer dannes det korrosjonsprodukter, som har et større volum enn det opprinnelige stålet. Dette gir deg utslag i oppsprekninger og utsprengt betong slik at armeringen frilegges.

Armeringens betongoverdekning måles med Covermeter for å kontrollere armeringens plassering, og om denne har en overdekning som forutsatt ved prosjekteringen. Covermetermålinger er beheftet med en viss grad av usikkerhet, så målingene er i dette tilfellet kalibrert mot enkelte opphugninger og måling med skyvelær. Ved opphugninger er også armeringens tilstand vurdert.

Overdekningsmålingene er presentert i tabell under kap. 2.7

2.3 Karbonatisering

Karbonatisering er en kjemisk prosess som skjer i betong ved at kalsiumhydroksid (Ca(OH)_2) i betongen reagerer med karbondioksid (CO_2) i lufta og danner kalsiumkarbonat (CaCO_3). Denne prosessen reduserer betongens pH-verdi.

Karbonatisering skjer i større eller mindre grad i all betong, og karbonatiseringsfronten beveger seg innover i betongen over tid. Prosessen har i seg selv en tettende effekt på betongen, slik at hastigheten vil avta noe over tid.

Betong har i utgangspunktet en pH på mellom 13 og 14, dvs. et meget alkalisk miljø. Dette gjør at armeringen som ligger i betongen er godt beskyttet ved dannelse av et oksidsjikt, eller passivfilm på overflaten av armeringen som hindrer korrosjon. Hvis pH-verdien rundt armeringen synker til under ca. 9, vil denne passivfilmen brytes, og det er dette som skjer når karbonatiseringsfronten nærmer seg armeringen. Karbonatisering vil også foregå innover langs overflaten i riss, slik at armering som krysser riss og sprekker vil være utsatt for korrosjon meget raskt etter at sprekene har oppstått.

Måling av karbonatisering skjer ved en opphugning inn til armeringen og deretter omhyggelig rengjøring av prøvestedet. Sårflaten påsprøytes en pH-indikator (fenolftaleinoppløsning) som gir fargeomslag ved $\text{pH} > \text{ca. } 9$ (fiolett). I enkelte tilfeller erstattes meislingen med utboring av kjerner. For begge metoder rengjøres prøvestedet omhyggelig før påsprøyting av fenolftalein.

Korrosjon som følge av karbonatisering gir som regel en jevn korrosjon på armeringsoverflaten, og fører til oppsprekninger og utsprengt betong. Resultater fra karbonatiseringsmålingene er vist i tabell under kap. 2.7.

2.4 Kloridprøver

Klorider er salter som kan ha sin opprinnelse i:

- Akselererende tilsetningsstoffer brukt ved produksjon av betongen.
- Tilslagsmaterialer som er benyttet.
- Salt fra ytre påvirkning. (Veisalt, sjøvann, luftbårne klorider etc.)

Klorider er skadelig for betongen ved at de trenger inn i betongen og bryter armeringens passivfilm lokalt, og dermed kan gi armeringskorrosjon. Kloridinitiert korrosjon fører ofte til svært alvorlige korrosjonsangrep ved at dette kan gi lokal groptæring. Elektriske krefter fører til at klorider tiltrekkes steder med allerede pågående korrosjon, og en meget høy korrosjonshastighet kan bli resultatet.

Kloridinitiert korrosjon gir ikke samme grad av ekspanderende korrosjonsprodukter, slik tilfellet er for korrosjon som følge av karbonatisering. Dette kan føre til at det ikke blir utsprenginger i betongoverflaten som et forvarsel på korrosjonsangrep.

For betong med standard sement legges vanligvis følgende grenseverdier til grunn:

Kloridinnhold i % av sementvekt	Sannsynlighet for korrosjon
< 0,4	Neglisjerbar
0,4 - 1,0	Mulig
1,0 - 2,0	Sannsynlig
> 2,0	Sikker

Grensekonsentrasjonene er også avhengig av porevannets pH, og høyere pH vil tåle noe mer klorider før korrosjon oppstår. Dette vil også si at dersom karbonatiseringsfronten nærmer seg armeringen (lavere pH) samtidig som det er funnet klorider, bør en være spesielt årvåken for mulig kloridinitiert korrosjon.

Resultater fra kloridmålingene er vist i tabell under kap. 2.7.

2.5 Prellhammertest

Det er utført prellhammertesting for om lag halvparten av de undersøkte prøveområdene. Prellhammertest (eller slaghammertest) består av at en stålsylinder slynges mot betongoverflaten og rekylverdien registreres. Verdien kan så leses av i en omregningstabell som igjen gir verdien i N/mm^2 . Metoden er en ikke-destruktiv måling av betongoverflatens fasthet, og kan under homogene forhold grovt sett benyttes som måling av betongens fasthet dersom verdiene sammenliknes med annen fasthetsmåling, f.eks. trykktesting av utborede kjerner. I dette tilfellet har vi som følge av betongens inhomogenitet kun benyttet målingene til å registrere variasjoner i betongoverflatens styrke for å danne et bilde av variasjoner av betongoverflatens varierende evne til å motstå skademekanismer som karbonatisering og kloridinntregning.

Målingene gjennomføres ved at det gjøres minimum 9 hammerslag mot overflaten som alle plasseres minimum 30 mm fra hverandre. Dersom et hammerslag treffer porer eller bom skal målingen forkastes.

Målingene gir en gjennomsnittlig prellhammerfasthet på ca $30 N/mm^2$ med et standardavvik på 10,3 for alle måleseriene med minimum 9 enkeltmålinger i hver serie.

Det store standardavviket gir uttrykk for relativt store variasjoner i betongoverflatens fasthet, i tillegg til målemetodens unøyaktighet på ca 20%.

2.6 Trykkprøving av borkjerner

Det er tatt ut i alt 29 borkjerneprøver for måling av betongens trykkfasthet og densitet.

Borkjernene ble tatt ut ved vannkjølt kjerneboring med diamantkrone og kjernenes diameter etter utboring var 92 mm. Kjernene ble umiddelbart etter uttak, tørket av med papir og pakket omhyggelig inn i plast for forsendelse til Multiconsults betonglaboratorium i Oslo.

Trykkprøvingen viser at gjennomsnittlig fasthet for betongen ligger rundt $30 N/mm^2$

Undersøkelse av kjernene viser også at det er noe grad av utfelling av alkalisk-gel ved vannlagring av betongprøvene. Dette vil antakelig ikke ha noen betydning ettersom betongen vil holdes forholdsvis tørr etter ombyggingen, og at utvikling av alkali-reaksjoner derfor kan holdes i sjakk.

Prøve id.	Dimensjon, mm		Densitet kg/m ³	Prøvet dato	Maksimal Last N	Trykkfasthet f_{is} N/mm ²
	Diam.	Høyde				
1.1	92,0	143,0	2410	14.11.17	197339	28,3
1.2	92,0	142,0	2370	"	155018	22,3
1.3	92,0	159,0	2420	"	296417	43,3
1.4	92,0	157,0	2370	"	119874	17,4
1.5	92,0	146,0	2370	"	188869	27,2
1.6	92,0	152,0	2400	"	195895	28,4
1.7	92,0	133,0	2370	"	200804	28,6
1.8	92,0	147,0	2390	"	207999	30,0
1.9	92,0	151,0	2380	"	241857	35,0
5.1	92,0	155,0	2390	15.11.17	252997	36,8
5.2	92,0	157,0	2400	"	180404	26,3
5.3	92,0	147,0	2390	"	269789	38,9
5.4	92,0	171,0	2400	"	215278	31,9
5.5	92,0	155,0	2280	"	126068	18,3
5.6	92,0	148,0	2510	"	212694	30,7
5.7	92,0	152,0	2470	"	242189	35,1
5.8	92,0	144,0	2420	"	172462	24,8
5.9	92,0	155,0	2440	"	183800	26,7

Prøve id.	Dimensjon, mm		Densitet kg/m ³	Prøvet dato	Maksimal Last N	Trykkfasthet f_{is} N/mm ²
	Diam.	Høyde				
8.1	92,0	156,0	2390	17.11.17	230510	33,5
8.2	92,0	156,0	2380	"	242538	35,2
8.3	92,0	101,0	2450	"	299944	40,2
8.4	94,0	184,0	2400	"	208872	29,9
8.6	92,0	145,0	2400	"	331227	47,6
8.7	92,0	141,0	2410	"	273378	37,6
8.8	94,0	188,0	2460	"	223863	32,3
8.9	94,0	131,0	2350	"	150673	20,4
8.10	92,0	140,0	2420	"	186250	26,6
8.11	92,0	102,0	2410	"	294199	39,5
F1, ytre	103,0	202,0	2380	21.11.17	432588	51,8
F1, indre	103,0	205,0	2370	"	366687	43,9
F2, ytre	103,0	197,0	2370	"	324789	38,6
F2, indre	103,0	198,0	2390	"	392902	46,8

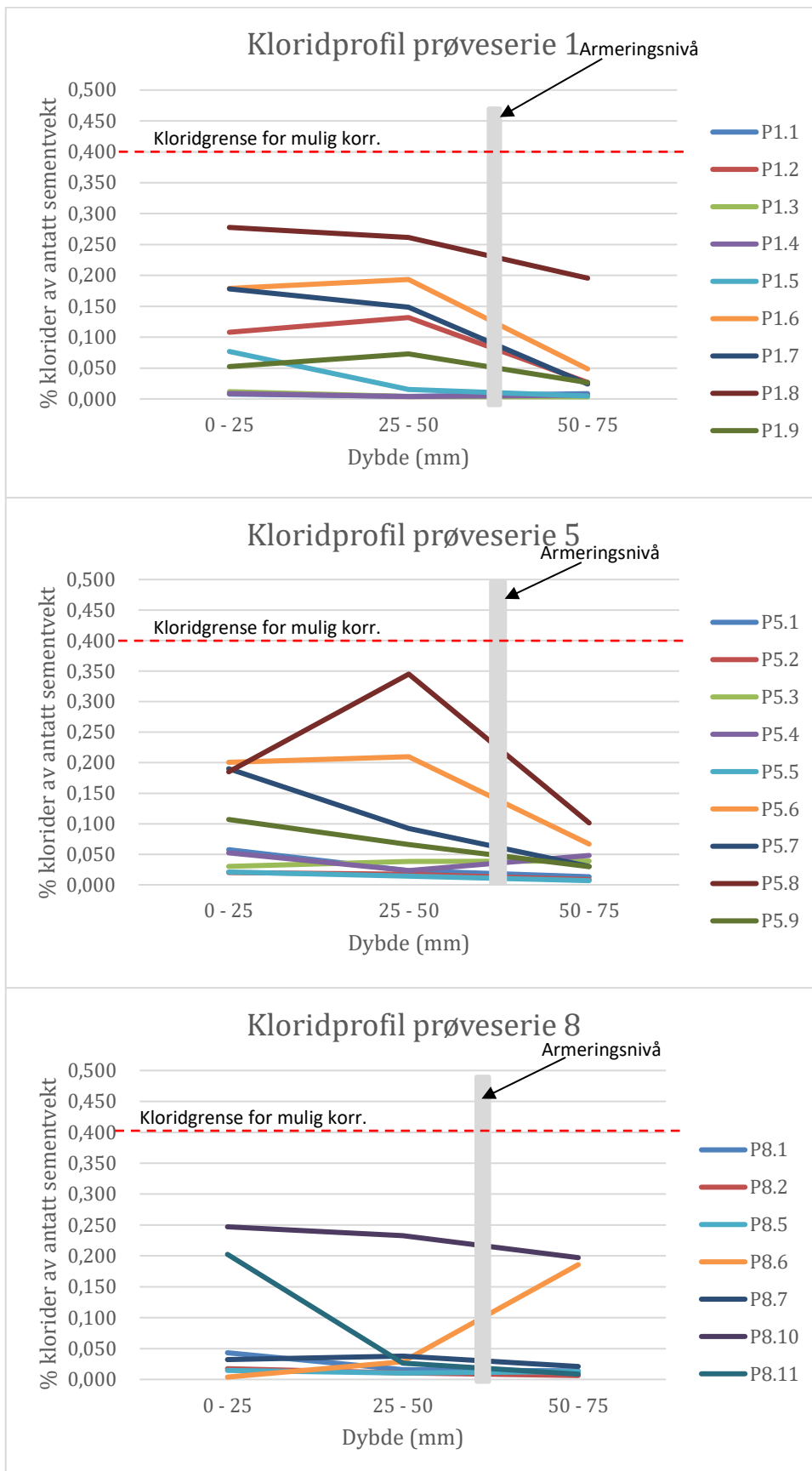
Det henvises for øvrig til Multiconsults rapport som følger vedlagt.

2.7 Prøveresultater

I det følgende er prøveresultater for de betongteknologiske undersøkelsene presentert. I forbindelse med henvisning til prøvesteder er det benyttet enkelte forkortelser, og dette er som følger: UK=underkant, OK=overkant, SK=sidekant, FK=forkant.

Prøve nr.	Kloridinnhold i % av betongvekt			Kloridinnhold i % av sementvekt			Overdekn. utside		Karb.	
	0 - 25	25 - 50	50 - 75	0 - 25	25 - 50	50 - 75	Min mm	Gj.sn mm	Utside mm	Innside mm
	%Cl	%Cl	%Cl	%Cl	%Cl	%Cl				
P1.1	0,001	0,001	0,001	0,008	0,004	0,009	30	40	33	63
P1.2	0,016	0,019	0,004	0,108	0,132	0,027	68	70	7	53
P1.3	0,002	0,001	0,000	0,012	0,004	0,003	58	60	39	60
P1.4	0,001	0,001	0,001	0,009	0,004	0,006	43	50	25	39
P1.5	0,011	0,002	0,001	0,077	0,015	0,005	65	69	8	34
P1.6	0,026	0,028	0,007	0,179	0,193	0,048	48	50	7	32
P1.7	0,026	0,022	0,004	0,178	0,148	0,024	28	55	23	44
P1.8	0,040	0,038	0,029	0,278	0,261	0,196	47	55	17	32
P1.9	0,008	0,011	0,004	0,052	0,073	0,026	43	56	13	30
P5.1	0,008	0,003	0,002	0,058	0,023	0,013	45	55	8	27
P5.2	0,003	0,002	0,001	0,020	0,017	0,008	35	55	5	22
P5.3	0,004	0,006	0,006	0,030	0,038	0,039	64	75	11	28
P5.4	0,008	0,003	0,007	0,052	0,023	0,048	54	66	7	31
P5.5	0,003	0,002	0,001	0,021	0,014	0,007	58	70	5	24
P5.6	0,029	0,031	0,010	0,201	0,210	0,067	30	50	10	47
P5.7	0,028	0,013	0,004	0,190	0,092	0,030	41	54	10	28
P5.8	0,027	0,050	0,015	0,185	0,345	0,101	14	41	14	27
P5.9	0,016	0,010	0,004	0,107	0,066	0,030	23	47	6	46
P8.1	0,006	0,002	0,002	0,043	0,016	0,014	43	55	4	28
P8.2	0,003	0,002	0,001	0,017	0,010	0,006	54	65	8	17
P8.3		0,003			0,020		40	50		43/48
P8.4		0,001			0,004		41	53		43/45
P8.5	0,002	0,002	0,002	0,015	0,010	0,013	57	71	4	
P8.6	0,001	0,004	0,027	0,004	0,029	0,186	27	42	10	17
P8.7	0,005	0,006	0,003	0,032	0,038	0,021	33	43	5	35
P8.8		0,001			0,008		29	50	35	33
P8.9		0,001			0,005		21	52	45	36
P8.10	0,036	0,034	0,029	0,247	0,233	0,197	30	46	7	28
P8.11	0,030	0,004	0,001	0,202	0,026	0,009	30	47	5	30

2.7.1 Kloridprofiler



3 TILSTANDSVURDERING

3.1 Visuelle observasjoner

Det er registrert en rekke skader i betongkonstruksjonene i silobygningen, og dette er i hovedsak sprekker og avskallinger som følge av både svinn og korrosjon på armeringen. Langt de fleste sprekkeene i siloene er gjennomgående sprekker, og flere av disse har tidligere blitt utbedret ved oppmeisling i V-form ca 40 - 50 mm inn i betongen. Innerst i huggelivet er det blitt påført en bitumeniøs fugemasse, antakelig for vanntetting av sprekkeene, før det utenpå dette er påført mørtel. Alle disse sprekkeene har i ettertid sprukket opp igjen, og mye av reparasjonsmørtelen er løst og falt av. Det er boret ut enkelte kjerner i områder med sprekker for visuelt å bedømme sprekkeene visuelt. Det er da boret gjennom både sprekker som er reparert og ikke. For alle steder hvor det er boret ut kjerner ved sprekker er sprekkeene funnet gjennomgående. Det er registrert flere tilfeller hvor tidligere reparasjoner har skallet av igjen, og hvor det er fare for nedfall av betongbiter. Det anbefales derfor å la sperringen rundt bygningen bli stående til utbedring skal foregå, slik at eventuell nedfall av betong ikke skader personer. Det henvises til vedlagte skadekart (CheckD-rapport).

Malingen på utvendig på betongoverflatene ser ut til å være av eldre dato. Malingsfilmen er svært medtatt og værslitt. Det kan nesten synes som overflatene har blitt utsatt for fasadevask med høytrykk, men forvitringen av malingsfilmen kan også ha sin årsak i naturlig nedbrytning. Malingsfilmen er såpass medtatt at den ikke lenger gir beskyttelse mot skademekanismer som karbonatisering og luftbåren kloridinntregning.

På innvendig side av silobygningen er det fortsatt mye rester etter kornlagringen, og det er for alle silokammer registrert betydelig avleiring av kornrester/støv de øverste 3 - 4 meterne i siloene. Videre er det ellers rundt omkring i bygningen store mengder fugleekskremitter, og det er registrert en del fuglekadavre som fører til ille lukt i hele bygningen. Før arbeidene med rehabilitering og ombygging tar til anbefales det at det utføres en omhyggelig sanering og rengjøring av hele bygningen for å unngå helseplager for personell som skal utføre rehabiliteringen.

3.2 Vurdering av prøveresultater

Med basis i de målinger og registreringer som er gjort er primær skademekanisme for silobygningen karbonatisering. Karbonatiseringsfronten ligger typisk i en dybde på ca. 20-30 mm for utvendig side, og hele 30 - 50 mm for innvendig side av siloene.

Den relativt store karbonatiseringsdybden for innvendig side antas å ha sin årsak i lagring av siloinnholdet (korn) som gjør luften oksygenfattig. Dette vil videre kunne føre til øket innhold av CO₂ og derav raskere karbonatiseringsforløp. Videre er betongen på innvendig side ubehandlet, mens hele silobygningen er påført maling på utvendig side.

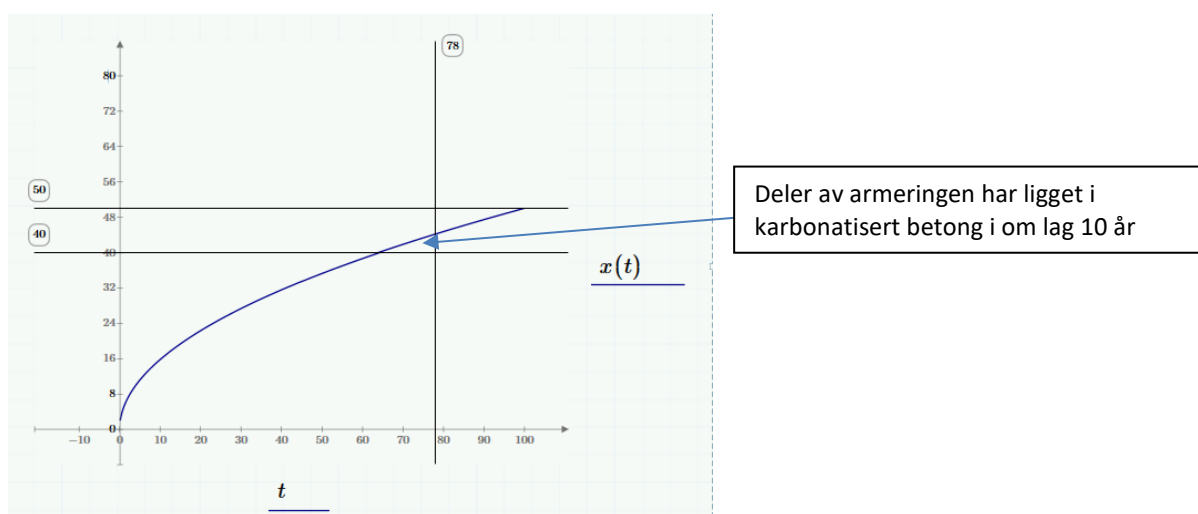
Med en enkel vurdering av karbonatiseringshastighet, basert på Fick's 1. lov for diffusjon, og armeringens gjennomsnittlige overdekning finner en følgende sammenheng:

$$x = k\sqrt{t}$$

hvor; x = karboniseringsdybde

k = konstant (bestemmes empirisk, med kjent t og x)

t = tid



Beregningen er basert på inngangsparametre fra tilstandsundersøkelsen.

For innsiden av siloene er det gjort kun fire målinger av overdekningen, men disse sammenfaller bra med hva armeringstegningene viser, ca 50 mm +/- 10 mm. Karboniseringsdybdene som er målt viser en gjennomsnittlig verdi på ca. 40 mm, med maksimalverdier på 63 mm og med et standardavvik på 13 mm. Byggets alder ved måletidspunktet settes til 78 år. Dersom en legger til grunn at både karbonatisering og overdekning følger normalfordelingen vil dette si at om lag 20-25% av armeringen på innsiden av siloene ligger i karbonatisert betong. Dette vil øke dersom utviklingen får fortsette uten at tiltak iverksettes.

For siloens utvendig side er gjennomsnittlig karboniseringsdybde mer beskjeden, ca 12 mm, men med målt maksimalverdi på 33 mm og et standardavvik på 11,5 mm. Overdekning på utvendig side er varierende, men gjennomsnittlig er det registrert ca 64 mm for 1935-delen og 57 mm for 1939-delen av bygningen. Standardavvik for disse målingene er ca 11 mm, og minste målte verdi er 14 mm. Det er enkelte jern som ligger i karbonatisert betong her, men hoveddelen av armeringen på utvendig side er fortsatt godt beskyttet, men unntak av de armeringsstenger som krysser sprekker og riss.

Det er for det meste funnet beskjedne mengder klorider i betongen, men med unntak av for prøvested 1.8, 5.6, 8.10 og 8.11 hvor det er funnet omlag 0,2% kloridinnhold av antatt sementvekt. Prøveresultatene kan tyde på at det for enkelte prøvesteder er en liten opphopning av klorider rett på innsiden av karbonatiseringsfronten. Dersom karbonatiseringsfronten og disse kloridene når armeringen samtidig, vil dette kunne føre til korrosjon på armeringen, og det anbefales derfor å utføre tiltak for å bremse dette.

4 TILTAK

Det anbefales at det legges opp til en reparasjonsstrategi som baserer seg på elektrokjemisk realkalisering i kombinasjon med mekanisk reparasjon. Alle tidligere reparerte sprekker anbefales å meisles ut på ny med vannmeisling for å sikre god fortanning og vedheft for ny mørtel. Alle øvrige sprekker repareres enten ved injeksjon eller som utmeisling og igjenfylling med reparasjonsmørtel. Det er viktig at alle produkter som benyttes er kompatible med hverandre i et komplett system, og kompatible med gjennomføring av elektrokjemisk realkalisering. Det er i det videre gitt en generell orientering om de foreslåtte tiltak.

4.1 Mekanisk utbedring av betongskader

Kriteriene for mekanisk reparasjon gjøres gjeldende for de flatene hvor det ikke utføres elektrokjemisk realkalisering, for utvendig side av silobygningen.

For innvendig side hvor det skal utføres realkalisering legges til grunn kriteriene for «forenklet mekanisk reparasjon» slik det er definert i RIF's «Veiledning til kapittel LY i NS3420 - Tekniske bestemmelser»

Ved valg av produkter, er det viktig at produktene er tilpasset til hverandre i et komplett reparasjonssystem, både av hensyn til funksjon og garantier/reklamasjoner.

4.1.1 Fjerning av betong/hugging

Alle sårflater skal avsluttes og utformes slik at en oppnår tilfredsstillende utfylling av såret. All fjerning av betong må utføres på en slik måte at armeringen ikke skades. Løst tilslag, ståltråd, spiker og evt. forskalingsrester fjernes. Der hvor armeringen ligger i karbonisert betong og armeringen korroderer, fjernes betongen i en dybde av 20 mm bak armeringen. Armeringen bør inn i ikke-karbonisert betong på alle kanter av reparasjonsområdet, eventuelt til et område der armeringen ikke viser korrosjon av betydning. Generelt gjelder at fjerning av betong må vurderes i forhold til omfang av skader, korrosjonshastigheter, kostnader og ønsket restlevetid for den enkelte konstruksjon. Vurdering av omfang bør utføres av erfarne fagpersoner da konsekvensen av valgene kan få store konsekvenser både for økonomi og sikkerhet. Et markant skille knyttet til meislingskriterier knytter seg til årsak for korrosjon, dvs hvorvidt korrosjon er initiert av karbonisering eller klorider.

Fjerning/kapping av armeringsstenger må ikke skje uten byggherrens godkjenning. Armering må under ingen omstendighet kappes eller frilegges før konsekvensene er vurdert. Generelt kan endearmering med mindre overdekning enn 5 mm kuttes slik at forskriftsmessig armeringsoverdekning oppnås. Alle sårflater skal være fri for støv, sementslam og løse partikler.

4.1.2 Rengjøring av armering

All rust, glødeskall og fremmedpartikler fjernes. (Rengjort armering skal ideelt sett tilfredsstillende kravene til rengjøringsgrad Sa 2,5 i NS 3420).

Hvis bærende armering er svekket eller korrodert bort, må denne erstattes med ny armering. Spesielt må man være oppmerksom på rengjøring og behandling av konstruktiv armering. Ved eventuelle tverrsnittsreduksjoner på bærende armering, må konstruksjonselementets statiske bæreevne vurderes særskilt i hvert enkelt tilfelle.

Sandblåsing/vasking er den absolutt mest effektive og anbefalte metode, men kan være lite praktisk anvendbar ved mindre sårreparasjoner. Det er meget viktig at armeringen også rengjøres på baksiden av jernet. Etter behandlingen skal overflaten ha en gråaktig farge.

4.1.3 Korrosjonsbeskyttelse av armering

Avhengig av metode for utmørtling skal armeringen påføres korrosjonsbeskyttelse. Det rengjorte armeringsjernet påføres korrosjonsbeskyttelse i hht. produsentens anvisninger som følges nøye ved blanding og utførelse. Dersom reparasjonene utføres med tørrsprøyting av reparasjonsmørtelen, er det ikke nødvendig med korrosjonsbeskyttelse.

4.1.4 Heftbro

For å sikre god heft mellom reparasjon og underlag bør det benyttes heftbro. Alle betongflater må være rene, og fri for løse partikler, sementslam og forurensninger. Før påføring av heftbro skal overflatene forvannes, men slik at underlaget fremdeles er sugende. Heftbroen må også dekke sårflatene bak armeringsstenger. Dersom reparasjonene utføres med tørrsprøyting av reparasjonsmørtelen, er det ikke nødvendig med heftbro.

4.1.5 Utfylling av sårflatene med reparasjonsmørtel

Det foretrekkes påføring av reparasjonsmørtel ved bruk av tørrsprøyting. Ved eventuell bruk av konvensjonell utfylling av sårflatene med reparasjonsmørtel må dette skje før heftbro får tørke ut/herde. Reparasjonsmørtelen påføres med egnet verktøy. Om nødvendig påføres mørtelen i flere lag, slik at den ikke siger eller løsner fra underlaget.

4.1.6 Overflatebehandling/impregnering

For å gi en god beskyttelse mot ny karbonatisering og/eller kloridinntregning bør betongoverflatene som skal eksponeres etter ombyggingen påføres en impregnering. Det anbefales å benytte Mapei Curlmp eller tilsvarende. Underlaget skal være rengjort og fritt for støv, sementslam, olje, malingrester etc. Spesielt skal en være oppmerksom på eventuelle krav til fuktinnhold i underlaget før overflatebehandlingen påføres.

4.2 Elektrokjemisk realkalisering

Elektrokjemisk realkalisering er en metode for å repassivere armeringen ved oppbygning av et beskyttende oksidsjikt rundt armeringen når passivfilmen har blitt brutt ved karbonatisering. Prosessen vil således gjenoppbygge den gode beskyttelsen armeringen hadde i utgangspunktet, og den vil stanse pågående korrosjon ved dannelse av magnetitt. Realkalisering utføres ved at det installeres en utvendig anode, et armeringsnett, som innbakes i en elektrolytt bestående av cellulosefiber fuktet med en elektrolytisk væske, som oftest kaliumkarbonat. Mellom anoden og armeringen påtrykkes det en spenning via en likeretter, og det oppstår følgende prosesser: Elektroosmose som fører til en transport av alkalier inn i betongen og hever pH til rundt 10,5, elektrolyse som fører til dannelse av OH⁻-ioner på armeringens overflate, og ionemigrering som sørger for elektrobalanse til hydroksidionene som forblir rundt armeringen.

Før prosessen settes i gang må flatene rengjøres, og alle betongskader som bom, sprekker og avskallinger utbedres ved forenklet mekanisk reparasjon. Alle tidligere reparasjoner meisles ut og erstattes med mørtel kompatibel med elektrokjemisk realkalisering. Det tas ut referanseprøver med angitt plassering for å dokumentere før-tilstand.

Det benyttes vanligvis anodenett av konvensjonelt armeringsnett, men dette kan føre til avsetning av korrosjonsprodukter på overflaten, og rustfritt nett eller nett av titan kan vurderes dersom det anses som uheldig med rustavsetninger.

Prosessen forutsetter god elektrisk kontakt for armeringen, og all armering skal være i kontakt med hverandre innenfor et behandlingsfelt. Dersom enkeltjern ikke har elektrisk kontakt vil disse forbli ubehandlet og kan fortsatt korrodere. Kravet er at målt motstand skal være mindre enn 1 ohm mellom to forskjellige jern. Manglede armeringskontinuitet kan utbedres ved slissing og påsveising av tverrgående armeringsstenger. Etter at nye kontaktpunkter er montert skal kontinuiteten sjekkes på nytt. Det etableres så lendingskontakter til armeringen med minimum 2 kontaktpunkter per m² betongoverflate.

Etter at trelekter og anodenett er montert på betongoverflaten monteres det kontaktpunkter for strømtilførsel til nettet. Det skal som minimum kobles 2 ledningskontakter per behandlingsfelt og ett punkt per 10 m².

Elektrolytten påføres ved sprøyting av fibermasse og vanning med kaliumkarbonat oppløst i vann. Det er avgjørende at elektrolytten omhyller hele anoden, og at det ikke er luftlommer bak fibermassen. Dette kan føre til underbehandling lokalt.

I løpet av behandlingstiden, som vanligvis er på mellom 5 og 10 dager, føres det kontrolljournal og dagbok. Det skal daglig logges temperatur, fuktighet i elektrolytten, utført arbeid med nedtegning og evt justering av strømstyrke.

Prosessen kan avsluttes når total avlevert strømmengde er minimum 200 Ah/m² armeringsoverflate, karbonatiseringsprøver viser mørk lilla farge, og opphugning inn til armering viser dannelse av mørk magnetitt på armeringsoverflaten.

Etter oppfylte sluttkriterer skrues strømmen av, anodenett og fibermasse fjernes og transporteres til godkjent mottak, og flatene rengjøres med høytrykksspyling.

5 Konklusjon

Å iverksette en betongrehabilitering av en slik konstruksjon som silobygningen er utfordrende på flere måter. For det første er bygningens utforming utfordrende på grunn av sin høyde og størrelse. Størstedelen av betongens overflater som vil være gjenstand for en rehabilitering befinner seg på innvendige arealer i silobygningen, og det er spesielt tilkomsten for arbeidene som er utfordrende.

Det er en forutsetning for vellykket utførelse av betongrehabiliteringen at det kan arbeides fra faste plattinger, f. eks. ved bruk av stillaser eller liknende. Dersom det velges en løsning med stillaser, kan det være aktuelt med både hengestillas fra toppen av siloene, og med konvensjonelt stillas bygget fra bunnen av siloene. I alle tilfeller må det benyttes tungt stillas på grunn av siloenes høyde. Dersom stillasene skal bygges fra bunnen bør den traktformede nedre delen av siloene rives slik at stillasene kan stå på gulvdekket på grunn. Heiser og kraner må også tilregnes for utførelse av rehabiliteringsarbeidene.

Det har i brukstiden for silobygningen både vært lagring av kornprodukter i selve siloene, men også i mellomkamrene mellom siloene. Det er spesielt for disse mellomkamrene det vil være vanskelig med tilkomst, og vanlig stillaser her vil antakelig ikke være praktisk mulig. Stillasene for denne delen av konstruksjonen må antakelig prosjekteres spesielt for anledningen.

Det må iverksettes spesielle tiltak for HMS under utførelsen av betongrehabiliteringen, da nedfall av utmeislet betong kan utgjøre meget stor fare.

En annen utfordring for gjennomføring av arbeidene vil være tilgang på friskluft. Det bør i den anledning derfor vurderes å rive både nedre del av siloene samt dekket øverst innen betongrehabiliteringen settes i gang.

Basert på prøvetakingen så langt vil en rehabiliteringsmetode for innvendig side av siloene være elektrokjemisk realkalisering. Dette er basert på at prøvetaking er foretatt for 15 av de totalt 30 silorørene. På grunn av dette vil anbefale at det tas supplerende prøver for både karbonatisering og overdekning for å avdekke om det kan være noen av siloene som ennå ikke er undersøkt, hvor karbonatiseringen ikke er så fremtredende, og at en med dette eventuelt kan utføre enklere tiltak for disse. Men er tendensen den samme for øvrige siloer, vil realkalisering være en god metode som vil sikre konstruksjonen en lang levetid.

Vi anbefaler at arbeidene med rehabilitering av siloen organiseres og gjennomføres som byggherrestyrt hovedentreprise. Dett for å sikre at nivået og omfanget for betongreparasjoner blir tett fulgt opp av byggherre, for derav sikre lang levetid for konstruksjonen.

Det er utarbeidet et kostnadsestimat for de anbefalte tiltak som er beskrevet i denne rapport. Kostnadene følger vedlagt.

6 Fotodokumentasjon



Silo nr 6 fra syd fasade øst. Gjennomgående sprekker tidligere utbedret, men reparasjoner skaller av.



Foto fra fasade mot øst. Sprekker som er utbedret tidligere sprekker opp på nytt.



Foto fasade mot øst. Område med omfattende oppsprekking. Tidligere reparasjon av sprekkene ikke vellykket.



Foto av fasade mot vest. Avskalling på grunn av korrosjon på armering. Værslitt og medtatt overflatebehandling.



Foto fasade mot syd. Svært fuktutsatt parti, omfattende oppsprekking og korrosjon på armeringen.



Foto fasade mot vest. Oppsprekking som følge av korrosjon på armering.



Bilde tatt innvendig i silorør. Omfattende lekkasjer fra gjennomgående sprekker



Bilde tatt innvendig i silo. Flere tidligere reparasjoner. Deler av armering ligger her i karbonisert betong, og armering med liten overdekning korroderer.